

### 3. Natura quantistica di fotoni e particelle materiali

Le particelle utilizzate per studiare i mezzi materiali obbediscono alle regole della meccanica quantistica. La loro natura perciò è duale, nel senso che le particelle possono essere considerate a volte come dei **corpuscoli** a volte come delle **onde**. Questo vale tanto per le onde elettromagnetiche, la cui versione corpuscolare sono i fotoni, e anche per gli elettroni, la cui versione ondulatoria sono le onde associate di De Broglie (che ci sono anche per tutte le altre particelle, compresi gli atomi e le molecole).

La differenza principale tra i fotoni e le altre particelle è che sono privi di massa, e questo comporta una differenza nelle leggi che mettono in relazione la proprietà corpuscolari con quelle ondulatorie.

I **fotoni** sono le “particelle” di luce che possiedono un’energia  $E$  che dipende dalla frequenza  $\nu$  in base alla relazione di Plank:

$$E = h\nu$$

Posso poi ricavare la relazione che lega il momento dei fotoni alla loro lunghezza d’onda  $\lambda$  ricordando che  $\nu\lambda = c$  e il fatto che  $E = pc$ :

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = pc \rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$$

Queste relazioni si possono anche scrivere nei termini della pulsazione  $\omega = 2\pi\nu$  e del numero d’onda  $k = 2\pi / \lambda$ :

$$E = \hbar\omega, p = \hbar k$$

Dove  $\hbar = h / 2\pi$  (h-bar).

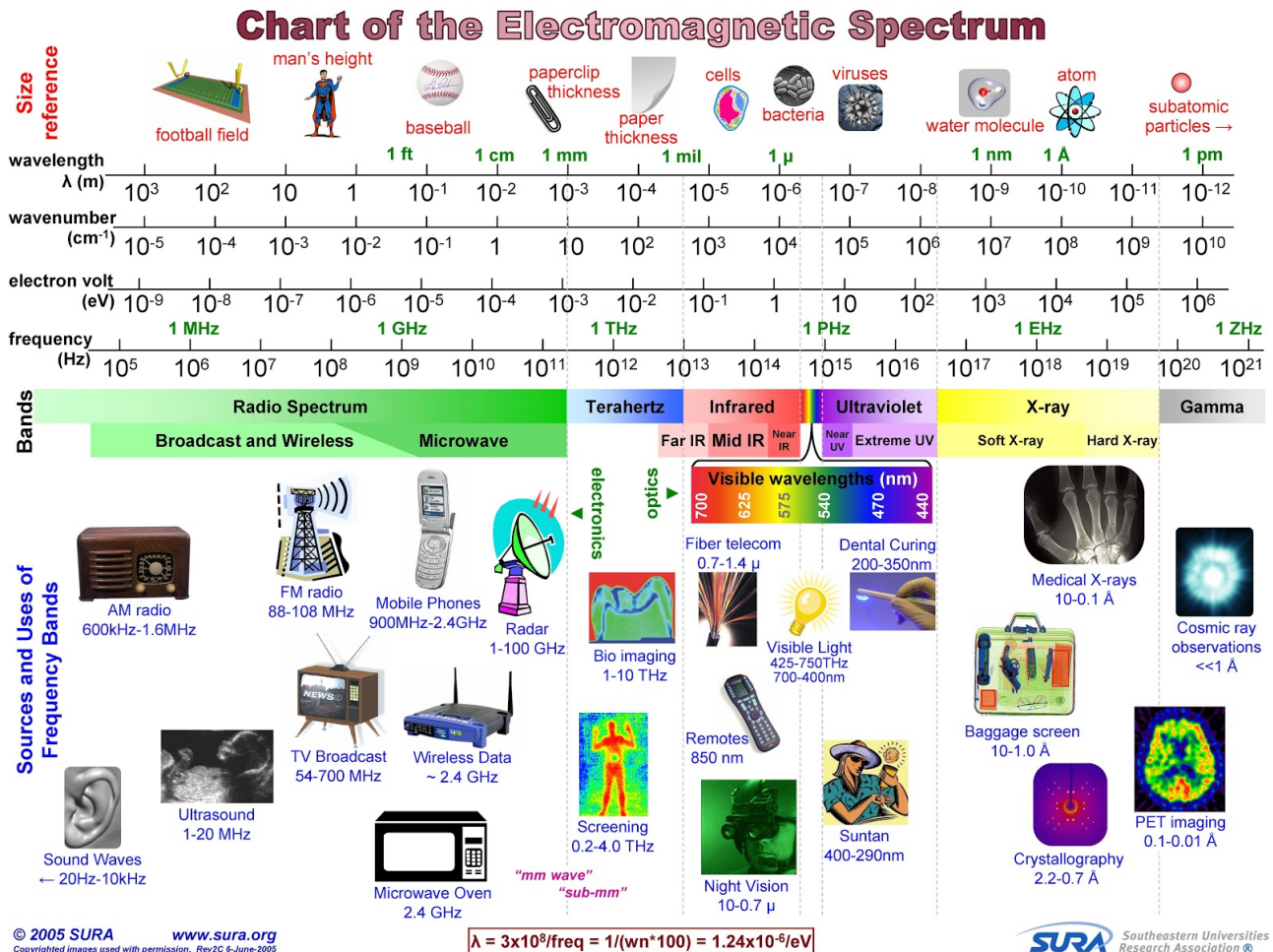
L’ipotesi di De Broglie fu proprio che queste relazioni debbano valere sia per i fotoni che per le particelle materiali. Nel caso di fotoni ed elettroni quindi abbiamo che:

<u>Fotoni</u>	
<i>Aspetto ondulatorio</i>	<i>Aspetto corpuscolare.</i>
$\lambda$ = lunghezza d’onda $\nu$ = frequenza $c$ = velocità di propagazione = $3 \times 10^8$ m/s (in vuoto)  $\lambda\nu = c$	Gli esperimenti dicono che gli scambi di energia della radiazione elettromagnetica sono multipli della sua frequenza (ipotesi di Plank, spiegazione di Einstein dell’effetto fotoelettrico):  $E = \text{energia di un fotone} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  $h = \text{costante di Planck} = 6.62 \times 10^{-34}$ Js = $4.13 \times 10^{-15}$ eVs  Il fotone ha massa zero e quindi, dalla formula relativistica, si ricava la nota relazione tra energia e momento di un’onda elettromagnetica:  $E = cp$

	<p>da cui:</p> $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ <p>si ricava immediatamente il legame tra la lunghezza d'onda <math>\lambda</math> del fotone e la sua energia E:</p> $\lambda = \frac{hc}{E}$ <p>Se si esprime l'energia in keV e la lunghezza d'onda in Å (<math>1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}</math>) si ha:</p> $\lambda(\text{\AA}) = \frac{12.4}{E(\text{keV})}$
--	---

<u>Elettroni</u>	
<i>Aspetto ondulatorio</i>	<i>Aspetto corpuscolare.</i>
<p>Lunghezza d'onda di De Broglie dell'elettrone</p> $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$ <p>Se si esprime l'energia in eV e la lunghezza d'onda in Å si ha:</p> $\lambda(\text{\AA}) = \frac{12}{\sqrt{E(\text{eV})}}$ <p>Nota. Se si considerano altre particelle materiali (che sono diverse perché diversa è la loro massa) vale sempre la relazione precedente ma con coefficienti numerici diversi. Nel caso dei neutroni ad esempio, molto più pesanti degli elettroni, nella formula precedente al posto del 12 si ha 0.28.</p>	<p>E = energia dell'elettrone p = quantità di moto dell'elettrone</p> $E = \frac{p^2}{2m}$ <p>m = massa a riposo dell'elettrone = <math>9 \times 10^{-31} \text{ kg}</math></p> <p>Nota. Questa è la relazione classica tra energia e momento di una particella, se si parte da quella relativistica e si fa uno sviluppo in serie, <math>p^2/2m</math> è il primo termine.</p>

## 4. Lo spettro elettromagnetico



Le equazioni di Maxwell ci dicono che possono esistere onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda ovvero a tutte le frequenze. Nell'ambito dei fenomeni naturali o in seguito a esperienze appositamente realizzate, è stato possibile osservare e produrre onde elettromagnetiche in un amplissimo intervallo di lunghezza d'onda (frequenza). L'insieme di tutte queste onde viene chiamato "spettro elettromagnetico".

I fenomeni fisici coinvolti nella generazione e nell'osservazione di tutte queste onde sono innumerevoli e per ciascun intervallo dello spettro si sono sviluppate branche specifiche della scienza e della tecnologia. Senza troppe pretese faremo ora una panoramica dello spettro elettromagnetico visitandone le regioni di lunghezza d'onda progressivamente decrescente. Nel descrivere ciascuna delle regioni dello spettro elettromagnetico cercheremo di evidenziare le più importanti applicazioni di quel tipo di onde, illustrando i principi fisici che si utilizzano per generarle.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, pur essendo numerosissime le modalità di generazione, tutte hanno in comune un aspetto, che già conosciamo: per produrre onde elettromagnetiche è necessario accelerare delle cariche elettriche. Tipicamente, per produrre onde in modo continuo è necessario far oscillare periodicamente le cariche elettriche. Si deve cioè disporre, per ciascun intervallo di frequenze, di un opportuno oscillatore di carica. Lo studio dell'oscillatore armonico meccanico ci ha insegnato che la frequenza di oscillazione dipende dalla rigidità della molla. Nel caso delle cariche elettriche, per generare onde di frequenza crescente, si devono utilizzare oscillatori sempre più rigidi e questo, come vedremo, significa usare oscillatori sempre più piccoli.

## Le onde radio

Il termine “onde radio” comprende una vastissima regione dello spettro, nella quale vengono incluse tutte le onde elettromagnetiche la cui lunghezza d’onda è superiore ad alcuni metri. Trattandosi di uno spettro così ampio la tecnologia ha coniato molti termini specifici per suddividere in modo più fine le onde radio in base alla loro lunghezza d’onda: onde lunghe, onde medie, onde corte, eccetera. In generale, queste onde trovano la loro applicazione nella trasmissione dei segnali radio. Per fare un esempio, le normali stazioni radio FM trasmettono i loro segnali utilizzando onde elettromagnetiche ad una frequenza intorno a 100 MHz (1 Megahertz =  $10^6$  Hz) cui corrisponde una lunghezza d’onda di circa 3 m.

Per generare le onde radio si utilizzano circuiti elettronici che fanno oscillare le cariche libere in un conduttore (l’antenna trasmittente) alla frequenza desiderata. A loro volta, le onde emesse mettono in oscillazione le cariche presenti all’interno dell’antenna ricevente, anch’essa un conduttore. Queste oscillazioni pilotano un ulteriore circuito elettronico che amplifica l’intensità del segnale raccolto dall’antenna e lo trasforma, nel caso della radio, in un segnale audio.

## Le microonde

Le microonde sono caratterizzate da una lunghezza d’onda che va da pochi metri a pochi millimetri. Questa regione dello spettro è diventata importante durante la seconda guerra mondiale, quando venne sviluppato il **radar**, un dispositivo in cui le microonde vengono emesse da un’antenna per poi essere riflesse dall’oggetto di cui si vuole rilevare la presenza, ad esempio un aereo o una nave. Misurando il tempo trascorso dall’emissione delle microonde al momento in cui le onde riflesse tornano al punto di partenza (dove è installata anche l’antenna ricevente), è possibile stabilire la distanza dell’oggetto che ha prodotto la riflessione.

Le frequenze delle microonde sono in genere molto elevate: si consideri, ad esempio, che un’onda di 3 mm ha una frequenza di 100 GHz (1 Gigahertz =  $10^9$  Hz). Attualmente i dispositivi elettronici sono in grado di operare normalmente fino a frequenze dell’ordine di alcune decine di GHz. Un esempio di apparecchiatura elettronica di largo consumo che sfrutta le microonde sono i telefoni cellulari, che operano a frequenze di 1.8 GHz. Il panorama delle applicazioni delle microonde è comunque destinato ad aumentare grazie al rapido sviluppo dei dispositivi elettronici.

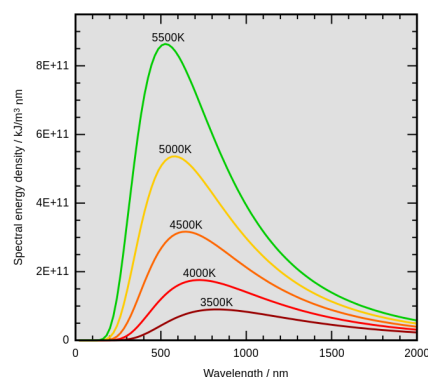
Per la generazione delle microonde, soprattutto per segnali di una certa potenza, il metodo più utilizzato si basa sull’impiego di apposite valvole nelle quali gli elettroni emessi da un filamento vengono fatti oscillare in vuoto. Uno di questi dispositivi è il **klystron**, che viene utilizzato nei comuni forni a microonde dove la frequenza generata è di 2.45 GHz.

## L’infrarosso

Per “radiazione infrarossa” si intendono le onde elettromagnetiche di lunghezza d’onda compresa fra alcuni millimetri e alcuni micron ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$  m). Per generare onde di questo tipo non è possibile utilizzare, allo stato attuale della tecnologia, circuiti elettronici, perché le frequenze in gioco sono troppo elevate. Si devono quindi sfruttare i dispositivi già esistenti in natura, nei quali le cariche elettriche oscillano spontaneamente alle frequenze desiderate. Un esempio di sistema oscillante la cui frequenza di risonanza si trova in questa regione dello spettro elettromagnetico è costituito dalle molecole. Consideriamo ad esempio la molecole dell’anidride carbonica, che

contiene un atomo di carbonio al quale sono legati due atomi di ossigeno. I tre atomi sono allineati fra loro, con l'atomo di carbonio in posizione centrale. Gli atomi di ossigeno possono vibrare, proprio come delle molle, intorno alla loro posizione di equilibrio. La frequenza di oscillazione connessa con le vibrazioni della molecola di anidride carbonica è tale per cui quando gli atomi (costituiti da particelle cariche) oscillano, vengono emesse onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda pari a circa  $10 \mu\text{m}$ . È su questo fenomeno fisico che si basa la produzione di luce infrarossa nei LASER a  $\text{CO}_2$  comunemente utilizzati nell'industria per il taglio dei metalli.

Le vibrazioni degli atomi che costituiscono la materia sono quindi responsabili dell'emissione di onde elettromagnetiche di tipo infrarosso. Quando si parla di vibrazioni atomiche è immediato pensare all'agitazione termica degli atomi. A temperatura ambiente (circa 300 K) sappiamo che gli atomi nella materia si trovano in uno stato di continua agitazione e, trattandosi di cariche in movimento, per quanto affermato in precedenza è lecito attendersi che a queste vibrazioni sia associata la generazione di onde elettromagnetiche nella regione dell'infrarosso. In effetti questo è proprio ciò che si verifica: tutti i corpi emettono radiazione elettromagnetica a una lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura. Per temperature relativamente basse, la maggior parte della radiazione emessa è di tipo infrarosso. Questo è per esempio il caso degli organismi viventi a sangue caldo, che si trovano a una temperatura superiore rispetto all'ambiente in cui si muovono. Questa differenza di temperatura fa sì che gli organismi viventi, per esempio gli esseri umani, emettano una maggiore quantità di radiazione infrarossa rispetto all'ambiente circostante. Questo fenomeno fisico viene sfruttato nei sistemi di sorveglianza con i quali, utilizzando delle particolari telecamere sensibili alla radiazione infrarossa, è possibile visualizzare l'immagine di persone o animali anche di notte, in assenza di luce visibile.



La legge di Wien, detta anche legge dello spostamento di Wien, consente di individuare per quale lunghezza d'onda  $\lambda_{\text{max}}$  è massima l'emissione radiativa di un corpo nero di massa generica posto ad una certa temperatura  $T$  assoluta.

$$T \cdot \lambda_{\text{max}} = b$$

dove

$$b = 2.8977685(51) \times 10^{-3} \text{ m K}$$

## La luce visibile

Le onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è compresa fra  $0.8 \mu\text{m}$  e  $0.4 \mu\text{m}$  hanno un ruolo molto importante nella nostra esistenza. Infatti, nonostante si tratti di un intervallo così piccolo dello spettro elettromagnetico, al suo interno ritroviamo tutto ciò che, nel linguaggio comune, è conosciuto come "luce". La visione, il nostro principale canale di comunicazione con la realtà, funziona perché le onde di questa specialissima regione dello spettro possono essere rivelate con incredibile efficienza da quel capolavoro di ingegneria che è l'occhio. Le straordinarie possibilità di questo sensore risultano evidenti in base a due diverse considerazioni.

Innanzitutto la sua sensibilità. L'occhio umano è in grado di rivelare segnali di luce debolissimi e, allo stesso tempo, di vedere correttamente in condizioni di forte illuminazione, come ad esempio accade in pieno giorno. L'altro aspetto è la sensibilità dell'occhio umano alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica nello spettro del visibile. L'enorme varietà di colori che il nostro occhio è in grado di percepire ne è una prova. Il colore, infatti, dipende dalla composizione in lunghezza d'onda della luce. Scorrendo l'intervallo di lunghezze d'onda della luce visibile, partendo da quelle maggiori, si passa dal rosso, al verde, al giallo, al blu.

La frequenza della luce visibile è dell'ordine di  $10^{15}$  Hz. Gli elettroni esterni degli atomi possono oscillare a queste frequenze, e infatti la luce visibile viene di solito generata in questo modo. Anche l'agitazione termica delle cariche di cui sono costituiti gli atomi può dar luogo all'emissione di luce visibile e, al crescere della temperatura, diminuisce la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche emesse. A temperatura ambiente, come visto in precedenza, si osserva emissione di luce infrarossa. A temperature dell'ordine di 1000 K si osserva l'emissione di luce visibile. Un esempio di questo tipo di emissione è fornito dai corpi incandescenti, per esempio un pezzo di metallo arroventato sul fuoco. Per temperature ancora più elevate la lunghezza d'onda della luce emessa diminuisce ulteriormente. A una temperatura di 6000 K la luce emessa appare al nostro occhio bianca, anche se in realtà è una miscela di molte lunghezze d'onda cui corrispondono tutti i colori dell'iride. È proprio questo il principio fisico su cui si basa la sorgente di luce più importante, il sole, la cui temperatura superficiale è appunto di circa 6000 K.

### **La luce ultravioletta**

Quando la lunghezza d'onda della luce è più piccola di  $0.4 \mu\text{m}$ , il limite inferiore dello spettro visibile, si parla di luce ultravioletta, per lo meno fino a lunghezze d'onda dell'ordine di alcune decine di nm ( $1 \text{ nanometro} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Questa è una delle regioni meno esplorate dello spettro elettromagnetico. Limitiamoci a dire che, anche in questo caso, per generare onde di questa lunghezza d'onda si utilizzano le vibrazioni degli elettroni esterni degli atomi.

### **I raggi X**

Quando la lunghezza d'onda assume valori più piccoli di qualche decina di nm si parla di radiazione X. Per poter emettere onde elettromagnetiche di questo tipo bisogna mettere in movimento gli elettroni interni degli atomi, che oscillano a frequenze molto più elevate di quelli esterni. Per questa regione dello spettro esistono tuttavia altri possibili meccanismi di generazione. La scoperta dei raggi X avvenne, casualmente, facendo incidere un fascio di elettroni, accelerati da un campo elettrico, su un elettrodo di metallo. In questo processo gli elettroni perdono molto rapidamente l'energia cinetica guadagnata e la brusca decelerazione che subiscono porta all'emissione di onde elettromagnetiche di tipo X. È su questo principio che operano i tubi a raggi X utilizzati in medicina.

Un'altra importante sorgente di radiazione X è rappresentata dai sincrotroni. Si tratta di grandi macchine nelle quali un fascio di elettroni viene fatto circolare lungo un'orbita poligonale. Per alcuni tratti gli elettroni viaggiano lungo una traiettoria rettilinea in modo inerziale. In alcuni punti però sono collocati dei potenti magneti che deflettono la loro traiettoria. Dopo aver subito un certo numero di opportune deviazioni, gli elettroni si ritrovano al punto di partenza e quindi continuano a circolare lungo l'orbita. La velocità a cui vengono fatti muovere gli elettroni è molto elevata, molto prossima a quella della luce, e le energie cinetiche corrispondenti sono dell'ordine dei GeV ( $1 \text{ Giga elettrone volt} = 10^9 \text{ eV}$ ). Quando elettroni così energetici subiscono una deflessione a opera dei campi

magnetici si ha un'accelerazione e, di conseguenza, anche l'emissione di onde elettromagnetiche su uno spettro abbastanza ampio che abbraccia la regione dei raggi X.

### **I raggi gamma**

Si parla di raggi gamma per indicare le radiazioni emesse nel corso dei processi in cui sono coinvolte le particelle nucleari, cioè i protoni e i neutroni. Nei nuclei le particelle si trovano a stretto contatto sotto l'azione di forze molto intense, e quindi le loro frequenze di oscillazione sono molto più elevate di quelle degli elettroni atomici. Di conseguenza, anche la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche emesse è molto più piccola, dell'ordine dei pm ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ) o meno. Le onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda più piccola fino ad ora osservate sono quelle presenti nei raggi cosmici, radiazioni di origine spesso ignota che raggiungono la terra dallo spazio.